合肥国产超导质子回旋加速器主真空控制系统的设计与实现

彭标[1]，陈根[2]，段文学[2]，李钢[3]，杨思皓[3]，徐晓天[3]

(1.安徽大学物质科学与信息技术研究院，安徽 合肥 230601；
2. 中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所，安徽 合肥 230031；
3. 合肥中科离子医学技术装备有限公司，安徽 合肥 230088)

摘要: 超导质子回旋加速器是我国自主研发最先进的医学放疗装置之一。真空系统作为加速器的关键子系统，它为加速粒子提供了必要的运行环境。本研究旨在设计加速器的真空控制系统，以维持稳定的高真空环境。本文基于加速器的真空设计需求，采用西门子可编程逻辑控制器 (PLC) 硬件系统和实验物理及工业控制系统（EPICS）软件框架完成了真空控制系统的设计。内容包括控制系统整体结构、系统运行逻辑、用户界面设计以及安全联锁等，结果表明，该系统在长期运行中，能使得真空系统保持高真空度，控制性能与稳定性满足设计要求，保障了加速器稳定运行。

关键词: 质子加速器；真空控制系统；EPICS；监控界面；安全联锁

中图分类号: TP273 **文献标志码:** **A** **doi：**

1 引言

癌症作为一种严重威胁人类健康的疾病，给患者和家庭带来了巨大的身体和心理负担[1,2]。为了有效治疗癌症，医学界一直在不懈努力探索新的治疗方法。在这个背景下，质子回旋加速器作为一种先进的医疗设备，为癌症治疗带来了新的希望[3,4]。目前，世界各地对质子回旋加速器的重视程度与日俱增。由合肥中科离子医学技术装备有限公司研发设计的超导质子回旋加速器，与常规回旋加速器相比，体积更小、占地面积最小且重量更轻，能耗更小；同时，具有更高强度输出束流，能够在 250Mev-70Mev 的全能量范围内达到 2Gy/升/分钟的剂量率。合肥国产超导质子临床医学验证中心项目于 2022 年 7 月正式开工，历时 9 个多月，现已具备国产设备分批进场、安装调试的条件。2023 年 5 月 26 日，合肥国产超导质子放射治

收稿日期: yyyy-mm-dd; **修改日期**：yyyy-mm-dd

基金项目：中国-俄罗斯超导质子“一带一路”联合实验室建设与联合研究（2020YFE0204800）

作者简介: 彭标（1997—），男，安徽阜阳人，硕士研究生，从事加速器物理研究； E-mail:1145211457@qq.com

疗系统回旋加速器在国产超导质子临床医学验证中心(合肥离子医学中心二期)正式吊装。加速器控制系统由超导磁铁系统、离子源系统和真空系统等多个子系统组成。真空系统作为加速器的被控系统之一，其主要任务是维持加速腔内的高真空环境，通过对真空设备进行监测和控制，以达到预设的真空度，减少气体分子对质子束的干扰[5]。然而，质子回旋加速器真空控制系统面临着一些挑战和难点。控制系统需要具备高度的可靠性和安全性，确保系统长期稳定运行并保持较高的真空度；真空系统要求控制系统能够对多个设备进行监测、控制和数据处理；同时，控制系统还需要与其他加速器子系统进行紧密的集成，以实现整体运行的协调和优化。本文旨在对合肥中科离子医学技术装备有限公司开发的240Mev超导回旋质子加速器真空控制系统进行深入研究和分析，设计并实现高可靠的真空控制。其主要工作和创新点可以概括为以下几个方面：首先，针对真空控制系统的设计，本文采用了基于可编程逻辑控制器（PLC）的分布式控制，并结合实验物理及工业控制系统（EPICS）软件框架，从硬件结构和软件流程两个方面出发，构建了一套完备的真空控制系统。该系统实现了对加速器真空系统的全面监测和灵活控制，为实现高效运行提供了坚实的技术支持。其次，文章明确定义了加速器真空系统的运行逻辑，包括自动模式和手动模式的切换，以及开机、运行、关机、破真空等流程的执行。这一设计保障了真空系统在不同工作状态下的高效且稳定运行，使得系统操作更为灵活可控。第三，本文创新性地设计了真空控制系统与安全联锁系统之间的信息交互和控制协调。通过设置阈值、报警、指令等接口信号，实现了真空系统在正常或异常情况下的安全运行。这项安全联锁机制有效地防范了真空泄漏、设备损坏、人员伤害等风险，提升了系统的整体安全性。最后，为验证真空控制系统的性能和可靠性，本文进行了系统测试与验证。通过对真空系统的漏率检测、执行逻辑测试和长期运行稳定性测试，成功验证了系统的卓越性能，确保其满足质子回旋加速器高真空环境的要求。这一系列的工作为加速器真空系统领域的研究和应用提供了有力的理论和实践支持。

2　真空系统概述

真空系统用于维持加速腔内的高真空环境，以减少气体分子对束流的干扰。根据加速器的性能要求，给出了各个部分的最低压强、最大泄漏率、最大气体负载等参数，如表1所示。真空系统还需要具备可靠性、安全性和可控性，能够通过远程操作和设备安全联锁实现长期稳定运行。根据系统的要求和功能，真空设备选型考虑了气体负载、抽气时间、流导、抽速和漏率等[6,7]因素。选择了以下真空设备：机械泵、罗茨泵、分子泵、低温泵、角阀、插板阀、真空测量仪等。这些设备具备高效抽气、容积压缩、容积变化、阀门控制、压强测量和气体分析等功能。使用罗茨机组作为前级泵，分子泵及低温泵作为高真空泵，气动插板阀控制抽气系统与加速腔的连接，真空规用于监测加速腔内部真空度。

表 1 真空系统设计需求表

腔体	技术参数	具体数值

加速腔真空	系统整体漏率	≤2×10^{-8}Pa・m^3/s
加速腔真空	工作真空度	$(1\sim8)\times10^{-3}$ Pa

3　控制系统结构

真空控制采用基于可编程逻辑控制器（PLC）的分布式控制，图 1 为真空控制系统整体结构设计。其中，硬件结构的核心部分采用西门子 PLC1500，该 PLC 具有高性能、高可靠性和高安全性的特点[8-10]。PLC 通过 OPC UA 协议与上位机系统进行通讯，实现数据读写和指令接收。PLC1500 被用作本地控制器，负责接收和处理各种真空设备的信号，实现对加速器真空系统的监控和控制。PLC 通过控制机械泵组、插板阀、气动角阀，实现设备的启停和阀门开关操作。同时，通过 RS485 通信网络，PLC 与分子泵、低温泵和真空计进行数据交换，实现数据提取和控制。为确保真空设备与 PLC 逻辑器之间的通信准确性，需要经过 MOXA Nport5430 将 RS485 通信转为网口接入。同时，还需要保证 3 块 NPort5430 Ethernet 端口与 PLC PROFINET 模块间的网段一致，统一处理所有 RS485 和 RS232 通讯。

控制系统的软件结构采用基于 EPICS 软件架构搭建，这是用于粒子加速器等大型科学装置控制系统的主流软件工具集。在此架构下，整个控制系统采用工业以太网作为骨干网络，所有分布式 PLC 站通过 PROFINET 接口接入网络，从而确保系统通信的高效稳定[11]。系统使用了 EPICS 软件架构来实现真空控制系统的数据处理功能，利用 EPICS 的 IOC(Input/Output Controller)和 CSS(Control System Studio)技术，实现了与 PLC 的通信和操作指令的发送。EPICS IOC 是用于与硬件设备通信的软件组件，它涵盖设备驱动、数据库、记录和扫描引擎等模块。配置 IOC 需要首先定义分子泵、低温泵等设备的通信协议(RS485)和地址，真空规的通信协议为 TCP/IP，地址为 192.168.*.**；随后，编写设备驱动程序以实现与设备的数据交换和控制指令发送；进一步编写数据库文件，定义设备的记录类型、字段、属性和初始值；最后，编写启动脚本，加载设备驱动程序和数据库文件，并启动 IOC 服务。

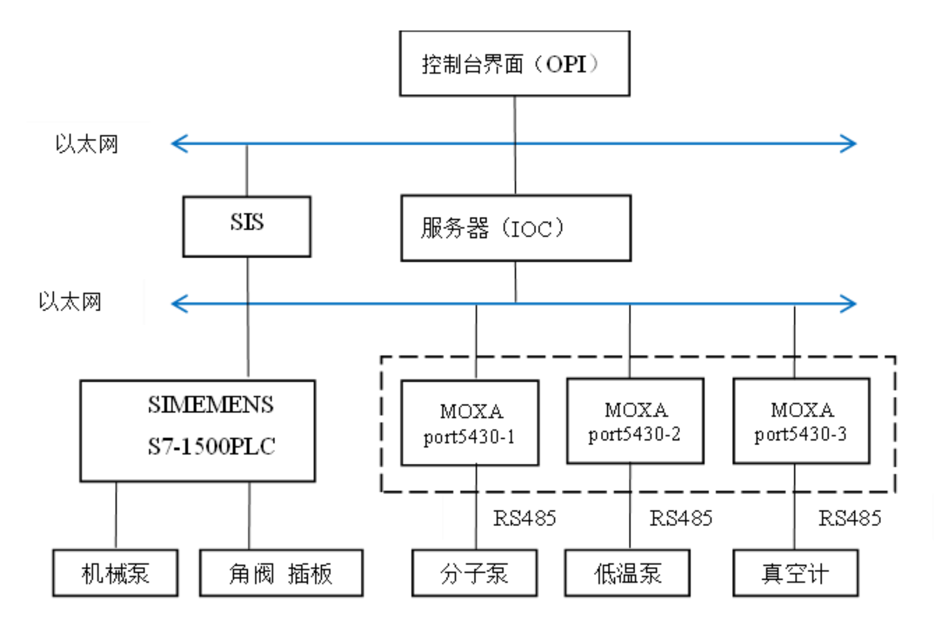


图 1 真空控制系统结构

4 真空控制系统软件设计

4.1 用户界面设计

用户界面使用 EPICS 组态软件作为开发工具，结合 Phoebus 和 CSS 技术，定制和优化监控界面。利用 Phoebus 处理真空系统实时数据、运行状态和报警信息，以直观易读方式展示在监控界面。通过 CSS 定义样式和布局，使界面更美观、易读和一致，提供操作指令和反馈信息，方便用户进行系统操作和故障排除。图 2 是真空控制系统的人机交互界面，用于控制真空设备和显示设备状态。在左上角的菜单栏中，可以选择不同的运行模式（自动或手动），以及查看系统信息和帮助文档；在右上角的工具栏中，可以设置用户权限、参数、报警、记录等功能；在左侧的导航栏中，可以切换不同的真空设备的监控界面，如机械泵、分子泵、低温泵等；在右侧的主界面中，可以查看和控制真空设备的工作状态、压力值、开关指令等信息。

该系统具有如下功能：(1)真空监测：通过真空计采集真空度数据，并通过电脑显示和记录；(2)真空调节：通过设置目标真空度，让真空控制系统自动调节真空泵和真空阀的开关，达到目标真空度。(3)真空保护：通过设置保护范围，让真空控制系统在真空度超出范围时自动关闭真空泵和打开大气阀，保护设备和样品。(4)真空报警：通过设置报警范围，让真空控制系统在真空度超出范围时发出声光报警，提醒操作人员。(5)真空记录：通过设置记录间隔，让真空控制系统定时记录真空度数据，并保存在电脑中。(6)真空管理：通过设置用户权限，让不同级别的用户可以进行不同的操作，如查看、修改、删除等。

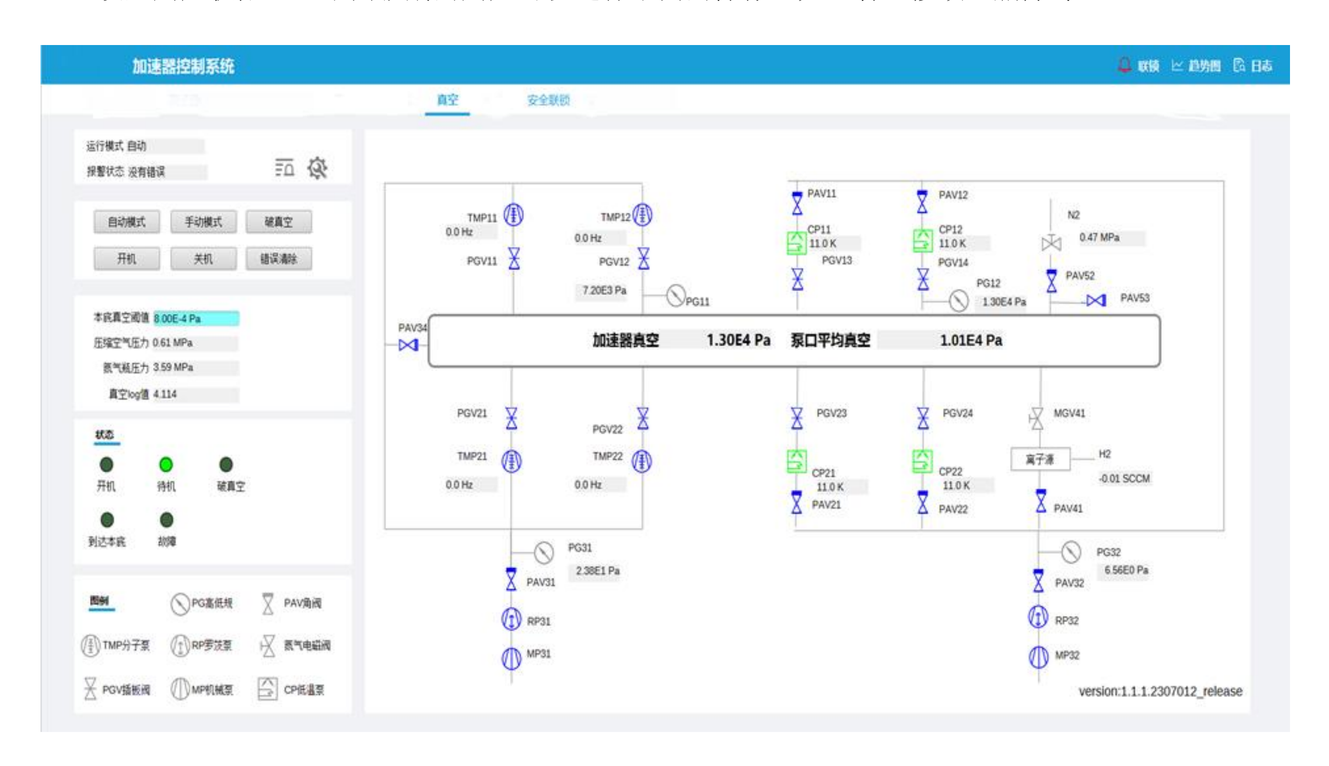


图 2　人机交互界面

4.2 系统控制逻辑

真空控制系统有两种运行模式，分别是自动模式和手动模式。自动模式下（如图 3 所示），PLC 根据

预设的阈值和顺序，自动执行开机、运行、关机、破真空等流程，无需人工干预。手动模式下，PLC 根据用户通过上位机或本地控制器发送的指令，执行相应的设备开关操作，需要人工干预。真空控制系统有四种运行流程，分别是开机流程、运行流程、关机流程和破真空流程。开机流程是指从加速器真空度大于 1000Pa 开始，到加速器真空度小于低温泵开启阈值结束的过程，主要包括自检设备、开启机械泵组、罗茨泵组、分子泵组和低温泵组等操作。运行流程是指在加速器正常工作时，维持加速腔内的稳定真空环境的过程，主要包括监测设备状态、处理报警信息、切换运行模式等操作。关机流程是指从加速器停止工作开始，到加速器真空度大于 1000 Pa 结束的过程，主要包括关闭插板阀、分子泵组、罗茨泵组、机械泵组等操作。破真空流程是指在加速器关机后，为了进行维护或更换部件而提高加速腔内的压力的过程，主要包括打开氮气阀、气动角阀等操作。

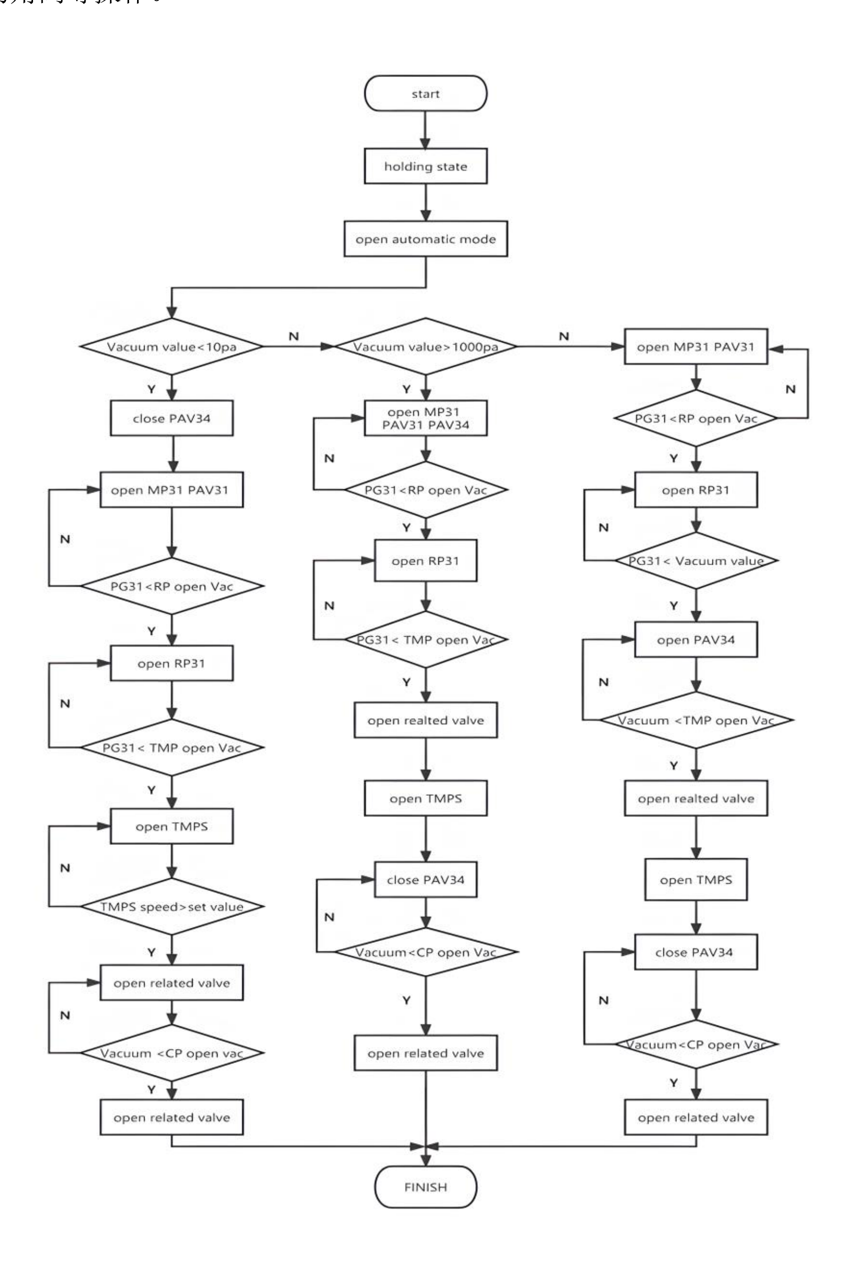


图 3　自动模式流程图

4.3 安全联锁

安全联锁机制是指 VCS（真空控制系统）与 SIS（安全联锁系统）之间通过硬件电缆和软件协议实现的信息交互和控制协调。其作用是协调各个子系统的运行状态，确保 VCS 系统在正常或异常情况下安全运行，避免真空泄漏、设备损坏、人员伤害等风险，如图 4 所示。真空系统的控制涉及前提条件、准备状态、抽气状态以及与离子源系统的调节。当真空系统发生故障时，需要迅速关闭离子源和 RF 系统，并与外部真空人员沟通，以判断是否需要关闭真空。VCS 与 SIS 之间的接口信号包括开关机、开始运行、紧急状况、系统状态、压力阈值等，通过高低电平的变化来指示状态，并发送控制指令，当出现真空泄漏、设备异常或 SIS 安全系统主动请求时，VCS 会立即终止真空抽气，关闭所有插板阀，并保持当前腔体压力。为了保证真空设备的安全和有效运行，控制系统对关键参数的阈值区间进行了严格的调试。例如设置了罗茨泵的开启真空阈值，以及分子泵的转速开启阈值等。通过这些能够监测设备的状态并在必要时采取相应措施。为确保安全联锁机制的有效性和可靠性，需要定期检查和测试。

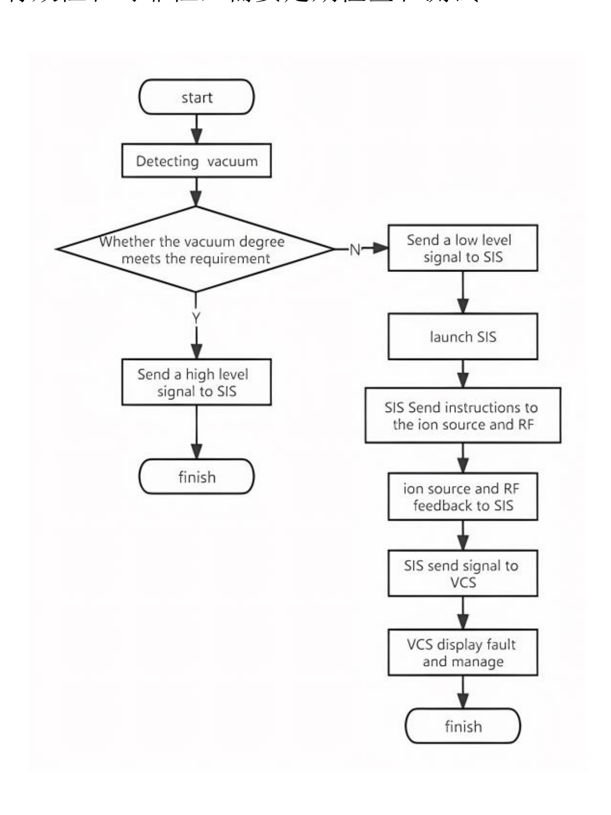


图 4　安全联锁流程图

5 测试与总结

5.1 系统漏率检测

真空系统漏率检测是一项关键的步骤，旨在确保真空系统的稳定性和正常运行。系统漏率检测的方法有以下几种：质谱仪法（Mass Spectrometer Leak Detection）、氦气检漏法（Helium Leak Detection）、压力上升法（Pressure Rise Test）。考虑到加速器的整体结构和真空度要求，决定使用氦检漏仪进行检测，通过向可疑的漏点喷射氦气，然后用探头探测氦信号，判断漏点的位置和大小，这种方法非常敏感，可以检测

到微小的气体泄漏，图 5 是检漏仪工作时界面。通过对真空阀（如插板阀、角阀）、真空管道（如管道接头、法兰、密封件等部位）、气管和冷却水管进行漏率检测后，氦气探测仪未显示明显的氦气泄漏信号，这意味着在测试的区域内，阀门、管道和其他关键部位的密封性良好，即检测结果满足要求。



图 5 真空检漏仪

5.2 执行逻辑测试

在不同流程下，对真空设备的执行逻辑进行了测试和验证，通过这些测试，确保了真空设备在各个操作阶段的正常运行和稳定性。图 6 是自动模式下加速器真空度变化曲线，显示了真空度从大于 1000 Pa 开始，控制系统各个组件工作后，真空度随时间的变化情况。在 t1 时刻，离子源开始充气，导致真空度上升，在 t1 到 t2 之间，离子源持续充气，在 t2 时刻，离子源停止充气，真空度开始下降。在 t2 之后，随着各个真空泵的工作，真空度数值逐渐降低，呈现出阶梯状的下降曲线。之后系统达到稳定状态，真空度约为 1×10^{-5} Pa。

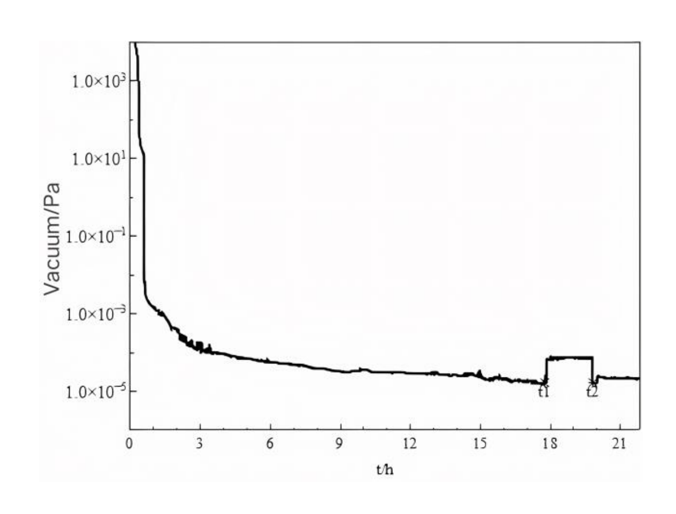


图 6 真空度数值曲线

5.3 系统长期运行稳定性测试

图 7 是真空系统长期运行状态下真空数值曲线图，其中包括开机、运行、关机、破真空等过程的调试。图 7 中的曲线包括以下几个阶段，分别对应不同的真空流程：第一阶段是开机以及运行流程，从 7 月 4 日开始，在这个阶段，真空度从高于 1000 Pa 下降到约 1×10^{-5} Pa，呈现出阶梯状的下降曲线。真空系统按照预设的顺序依次开启了机械泵组、罗茨泵组、分子泵组和低温泵组，逐步提高了加速腔内的真空度。之

后真空度保持在约 1×10^{-5} Pa 的水平，基本不发生变化。真空系统在加速器正常工作时，维持了加速腔内的稳定真空环境，没有发生任何异常或报警情况。第二阶段是关机流程，在 7 月 6 号上午。在这个阶段，真空度从约 1×10^{-5} Pa 上升到高 1×10^{-2}Pa，呈现出阶梯状的上升曲线。第三阶段是破真空流程，从 7 月 6 日晚上开始，在这个阶段，真空度从约 1×10^{-5} Pa 上升到高于 1×10^{4} Pa，呈现出阶梯状的上升曲线。这是因为真空系统按照预设的顺序依次打开了氮气阀、关闭了低温泵组、分子泵组、罗茨泵组和机械泵组。

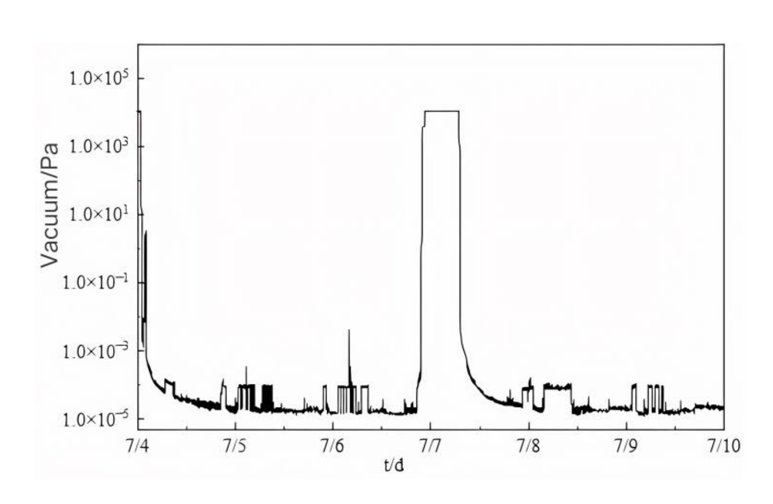


图 7 真空度数值曲线

5.4 总结

系统通过调试后，经过氦检漏仪的系统漏率检测，覆盖了真空器件、管道、气管和冷却水管，修复了漏点，确保系统漏率低于 2×10^{-8} Pa • m^3/s，符合加速器最大泄漏率要求。通过对系统逻辑执行的测试，验证了自动和手动模式的切换，以及开关机、运行和破真空等流程的准确可靠。实际运行稳定性测试表明系统在加速器实际运行条件下长期稳定，监测参数无异常。综上，该系统可用于维持质子回旋加速器的高真空环境，保证加速器的正常运行和安全性。

真空控制系统作为质子回旋加速器的关键组成部分，是加速器运行的前提和保障，能够直接影响整个加速器的性能和工作效率。真空系统的质量和稳定性对保持加速器内部的低压环境至关重要，确保束流在加速器中的稳定传输。基于质子加速器项目中真空控制系统的经验，我们进一步优化和实现了真空控制系统。在质子回旋加速器的运行过程中，真空控制系统表现出色，运行可靠、稳定。这种控制系统的成功应用为类似质子回旋加速器真空控制系统的设计和优化提供了有价值的经验。

参考文献:

[1] Bray F , Laversanne M , Weiderpass E,*et al*. Cancer,2021, 127: 3029-3030

[2] Sung H, Ferlay J, Siegel R L, *et al*. CA Cancer J Clin, 2021, 71: 209-249

[3] Lawrence J H, et al. Cancer, 1957, 10: 795–79

[4] Smith A R, et al. Med Phys, 2009, 36: 556–568

[5] Parkhomchuk V, et al. Physics of Particles & Nuclei Letters, 2006.

[6] YANG Sihao, DONG Xueping, DING Kaizong, *et al*. Design of the Main Vacuum System of Hefei Medical Medium Energy Superconducting Proton Cyclotron[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022,42(12):896-900(in Chinese)（杨思皓,董学平,丁开忠等.合肥医用中能超导质子回旋加速器主真空系统设计[J].真空科学与技术学报,2022,42(12):896-900)

[7] ZHU Lei, ZHANG Wuquan, HHUANG faling Design of Beam Transport Vacuum System and Control for SC200 Superconducting Proton Cyclotron[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(10): 850-856(in Chinese)（朱雷,张午权,黄发领.SC200超导质子回旋加速器束流传输真空系统及控制设计[J].真空科学与技术学报,2019,39(10):850-856)

[8] Kang M T, Huang T, Zhang Y L, *et al*. Design and Implementation of the Vacuum Control System for CSNS Accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(08): 66-72(in Chinese) (康明涛,黄涛,张玉亮等.CSNS加速器真空控制系统的设计与实现[J].强激光与粒子束,2020,32(08):66-72)

[9] JIANG Ziyun, ZHANG Peng, NIU Xiaofei, *et al*. Vacuum Control System for the Accelerator Driven Subcritical System Injector II[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(08): 238-242(in Chinese) (姜子运,张鹏,牛小飞等.加速器驱动次临界系统注入器Ⅱ的真空控制系统[J].强激光与粒子束,2015,27(08):238-242)

[10] MA Ruigang, CUI Baoqun, LI Ailin, *et al*. Development of the Control System for the Jinping Deep Earth High Current High Voltage Accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(08): 1700-1706(in Chinese) (马瑞刚,崔保群,李爱玲等.锦屏深地强流高压加速器控制系统的研制[J].原子能科学技术,2022,56(08):1700-1706)

[11] CHEN Yue, LI baosheng, YUAN Xiaolin, *et al.* Design of the EAST Vacuum Centralized Control System Based on EPICS[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(07): 497-503(in Chinese) (陈跃,李保生,袁啸林等.基于EPICS的EAST真空集控系统设计[J].真空科学与技术学报,2022,42(07):497-503)

[12] ZHANG Yiwang, CAO Lei, HOU Sigang, *et al.* Development of the Control System for the CYCIAE-100 Cyclotron Proton Radiography Beamline[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(01): 156-160(in Chinese) (张祎王,曹磊,侯世刚等.CYCIAE-100回旋加速器质子照相束流线控制系统的研制[J].原子能科学技术,2018,52(01):156-160)

Design and implementation of main vacuum control system of domestic superconducting proton cyclotron in Hefei

PENG Biao[1)]，CHEN Gen[2]，DUAN Wenxue[2]，LI Gang[3]，YANG Sihao[3]，XU Xiaotian[3]

（1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Anhui Hefei 230039, China;

2. Institute of Plasma Physics，Chinese Academy of Sciences (CAS)，Hefei Institutes of Physical Science，Anhui Hefei 230031，China;

3.Hefei Kerson Ion Medical Technology Equipment Co，Ltd，Anhui Hefei 230088，China）

Abstract: The superconducting proton synchrotron is one of the most advanced domestically developed medical radiation therapy devices in China. As a crucial subsystem of the accelerator, the vacuum system provides the necessary operational environment for particle acceleration. This study aims to design the vacuum control system for the accelerator to maintain a stable high vacuum environment. Based on the vacuum design requirements of the accelerator, the design of the vacuum control system was accomplished using Siemens Programmable Logic Controller (PLC) hardware and the Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) software framework. The content includes the overall structure of the control system, system operational logic, user interface design, and safety interlocks. The results indicate that, during long-term operation, the system maintains a high vacuum level, and the control performance and stability meet the design requirements, ensuring the stable operation of the accelerator.

Key words：Proton accelerator, vacuum control system, EPICS, monitoring interface, safety interlock

Received date：yyyy-mm-dd； **Revised date**：yyyy-mm-dd

Foundation item：China-Russia Superconducting Proton "Belt And Road" Joint Laboratory Construction And Joint Research(2020YFE0204800)